

# Protokoll: Myonenspektrometer

Philipp Hacker

12. Januar 2015

Betreuer: Prof. Dr. R. Hippler  
Versuchsdatum: 16./17./18.12.2014

Note:

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Entstehung und Zerfall von Myonen . . . . .	3
2.2	Myonenspektrometer . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1	Rate der einfallenden Myonen . . . . .	8
4.2	Lebensdauer der Myonen . . . . .	10
4.3	Absorption . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Quellen</b>	<b>14</b>

# 1 Einleitung

Das Myon  $\mu^\pm$  wurde 1936 von C.D. Anderson und S. Neddermeyer während der Untersuchung kosmischer Strahlung entdeckt. Es ist ein Zerfallsprodukt dessen, welcher unter Wechselwirkung mit unserer Atmosphäre hervorgerufen wird. Heute können sie künstlich in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden. Sie gehören, genau wie das stark ähnelnde, jedoch viel leichtere Elektron, zu den Leptonen. Ihre Beobachtung auf der Erdoberfläche kann als Bestätigung der relativistischen Zeitdilatation angesehen werden. Ihre Lebensdauer allein würde, selbst beim Abstieg aus der oberen Atmosphäre mit Lichtgeschwindigkeit, nicht ausreichen, damit wir sie mit einfachen Mitteln im Labor messen könnten.

In diesem Versuch soll gerade diese Zeit gemessen werden. Weiterhin werden statistische Aussagen über den Zerfall und den Myonen-Strom aus der Atmosphäre gemacht. Dafür wird im Folgenden auf die Wechselwirkung dessen mit Materie und die grundlegenden Prinzipien der Myonenspektrometrie eingegangen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Entstehung und Zerfall von Myonen

Durch die *primäre kosmische Strahlung* wird die Atmosphäre der Erde mit, größtenteils schweren Partikeln beschossen. Diese sind in der Regel Protonen und  $\alpha$ -Teilchen, können jedoch auch große Nuklide sein. Dieser Schauer aus schweren Teilchen wechselwirkt mit den Molekülen der Erdatmosphäre und zerfällt dabei, gegebenenfalls in mehreren Schritten, kaskadierend in seine Bestandteile. Das Zwischenprodukt der kosmischen Strahlung enthält, unter Anderem, Protonen, Pionen, Neutronen, Kaonen, Photonen, Elektronen und Positronen.

Das zu untersuchende Teilchen in diesem Versuch ist das Myon  $\mu^\pm$ . Dessen Flussdichte liegt bei etwa  $100 \frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ . Es gehört zu den Leptonen und ist einfach positiv bzw. negativ geladen (Anti-/Myon), wobei das Verhältnis  $\mu^+/\mu^- = 1,27$  beträgt. Es ist in seinen Eigenschaften vergleichbar mit dem Elektron: es besitzt einen Spin von  $1/2$  und unterliegt nur der elektroschwachen, nicht jedoch der starken Wechselwirkung. Im Unterschied zum  $e^-$  ist jedoch seine Masse um etwa das 200-fache größer und es besitzt nur eine mittlere Lebensdauer von  $2,196 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . Der Fakt, dass wir trotzdem in der Lage sind, das Myon, welches in einer Höhe von rund 10 km in der oberen Atmosphäre entsteht, an der Erdoberfläche zu messen, ist Folge der relativistischen Zeitdilatation bewegter Inertialsysteme.

Das gesuchte Teilchen entsteht zusammen mit einem Anti-/Neutrino aus dem spontanen Zerfall eines Pions  $\pi^\pm$  (Gl. (1), (2)).

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

Die freien Myonen zerfallen nun mit hoher Wahrscheinlichkeit, unter Verlust ihrer kinetischen Energie, in ein Elektron/Positron und 2 jeweilige Anti-/Neutrinos.

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (3)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (4)$$

Abb. 1 zeigt das Feynman-Diagramm des Zerfalls des Antimyons in ein Myonenneutrino, Elektronenantineutrino und Elektron. Dabei überträgt das negativ geladene Elementarteilchen des  $W^-$ -Bosons<sup>[1]</sup> die elektroschwache Wechselwirkung, welche zur Erzeugung des Elektron-Antineutrino-Paares nötig ist.

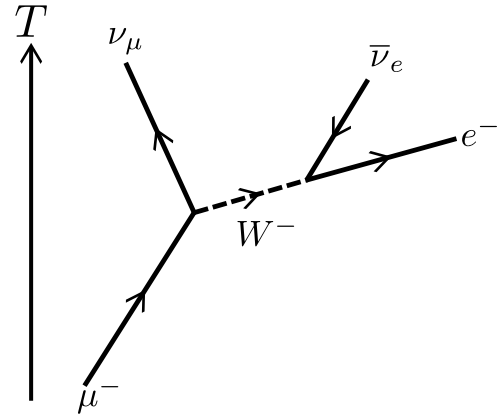


Abb. 1: Feynman-Diagramm des Zerfalls eines  $\mu^-$

Außerdem ist es möglich, dass der Myonen-Zerfall Photonen (Gl.(5)) aussendet (Wahrscheinlichkeit 1,4%)<sup>[1]</sup>, oder ein Elektron-Positron-Paar (Wahrscheinlichkeit  $3,4 \cdot 10^{-3}\%$ )<sup>[1]</sup> erzeugt (Gl. (6)).

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma \quad (5)$$

$$\mu^- \rightarrow 2e^- + e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \mu^+ \rightarrow e^- + 2e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (6)$$

Mit einer zu  $Z^4$  proportionalen Wahrscheinlichkeit, wobei  $Z$  die Kernladungszahl ist, kann ein negatives Myon mit einem Atom, unter Einfang eines Elektrons der K-Schale, ein *myonisches Atom* bilden und dadurch in das Nuklid eingezogen werden. Die damit ausgelöste Umwandlung eines Protons in ein Neutron findet unter Emission eines  $\nu_\mu$  statt. Die Zeit dieses Vorgangs ist klein gegen die Lebensdauer des  $\mu^-$ , jedoch ergibt die Messung in Materie eine Zerfallszeit von Myonen, welche kleiner als die, der im Vakuum gemessenen Zerfälle ist. Die Halbwertszeit positiver Myonen ist offensichtlich damit größer, da für sie kein zusätzlicher Zerfallskanal besteht.

Unter spontanem Zerfall folgt die Zahl  $N$  der Myonen Gl. (7). Dabei ist die Anzahl  $N_0$  zu einer Zeit  $t_0$  bekannt. Die Zerfallsrate  $\lambda$  lässt sich außerdem in die mittlere Lebensdauer, oder auch Halbwertszeit  $\tau = 1/\lambda$  überführen und umgekehrt.

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (7)$$

Wie bereits besprochen sind die Lebenszeiten aller Myonen nicht gleich. Daher ist es sinnvoll, eine Zerfallszeitverteilung aufzustellen. Die Wahrscheinlichkeit eines Zerfalls im Intervall  $[t, t + dt]$  sei Gl. (8). Damit ergibt sich die Verteilung der Zerfallsraten und analog Zerfallszeiten in Gl. (9).

$$-\frac{dN}{N_0} = \lambda \exp(-\lambda(t - t_0)) dt \quad (8)$$

$$D(t) = -\frac{dN}{N_0 dt} = \lambda \exp(-\lambda(t - t_0)) \quad (9)$$

Sei nun die Lebensdauer der Myonen, welche mit einem Nuklid im Aufbau wechselwirken,  $\tau'$  und  $\tau_{\text{spec}}$  der zu erwartende Mittelwert für alle Teilchen. Außerdem sind  $\lambda^\pm$  die jeweiligen Zerfallsraten und  $N^\pm$  die Zahl der eintreffenden Myonen pro Zeit. Somit lässt sich einerseits das Mittel der Zerfallsraten  $\langle \lambda \rangle$  in Gl. (10) und  $\tau_{\text{spec}}$  in Gl. (11) hinschreiben.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{N^+ \lambda^+ + N^- \lambda^-}{N^+ + N^-} \quad (10)$$

$$\tau_{\text{spek}} = \frac{\tau + \tau - (N^+ + N^-)}{N^+ \tau^+ + N^- \tau^-} \quad (11)$$

Für diesen Versuch kann man  $\tau' = \tau^-$  setzen. Zusätzlich benutzt man nun, dass  $\tau^+$  gerade der Myonen-Lebensdauer im Vakuum  $\tau_\mu$  entspricht. Setzt man nun  $N^+ = N^-$ , so kann man leicht die zu erwartende Halbwertszeit  $\tau_{\text{spec}}$  abschätzen.

$$\tau_{\text{spec}} \approx \frac{2\tau_\mu \tau'}{\tau_\mu + \tau'} \quad (12)$$

Mit Hilfe dieser Abschätzung kann man wiederum das Verhältnis der einfallenden Myonen im betrachteten Energieintervall beschreiben.

$$\frac{N^+}{N^-} = -\frac{\tau_\mu}{\tau'} \left( \frac{\tau' \tau_{\text{spec}}}{\tau_\mu + \tau_{\text{spec}}} \right) \quad (13)$$

## 2.2 Myonenspektrometer

Der Detektor dieses Versuchs ist ein Szintillationszylinder mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 12,5 cm. Dieser befindet sich am Boden eines, auf elektrisches Null-Potential gelegten Aluminiumbehälters.

Hauptsächlich besteht der Szintillator aus Polyvinyltoluen, welches unter einem einfallenden Teilchen zur Fluoreszenz angeregt wird. Dies geschieht auf Grund der Umwandlung der kinetischen Energie in Ionisations- bzw. Anregungsenergie der Moleküle. Die Relaxation der angehobenen Zustände findet nach einer spezifischen Zerfallszeit statt und sendet Photonen aus. Dies ist als Lichtblitz im transparenten Szintillationsmedium zu sehen.

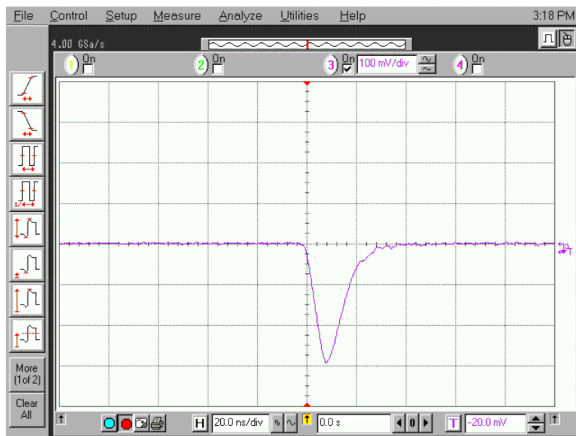
Myonen großer Impulse durchfliegen den Detektor unter Abgabe eines nur sehr kleinen Teils ihrer Energie nur und lassen keine Rückschlüsse auf die Zerfallszeit zu. Gerade Teilchen mit einer Bewegungsenergie beim Eintritt von etwa 150 MeV bremsen vollständig im Szintillator ab. Diese erzeugen sowohl beim Abbremsen, als auch während und nach dem Zerfall Lichtblitze. Dies liegt an dem großen Massenunterschied der Produkte aus Gl. (3) und (4), welcher in die kinetische Energie dieser umgewandelt wird. Insbesondere das Elektron aus dem Zerfall erzeugt weitere Lichtblitze. Neutrino und Antineutrino entgehen der Messung vollständig.

Sämtliche Lichtblitze werden von einem Photoelektronenvervielfacher (PMT) aufgenommen und, wie der Name bereits ausdrückt, in ein stärkeres elektrisches Signal transformiert. Mittels einer Photokatode und einem kaskadierenden Sekundärelektronenvervielfacher werden so die wenigen Photonen in eine, bspw. für eine digitale Schaltung verwertbare Spannung umgewandelt.

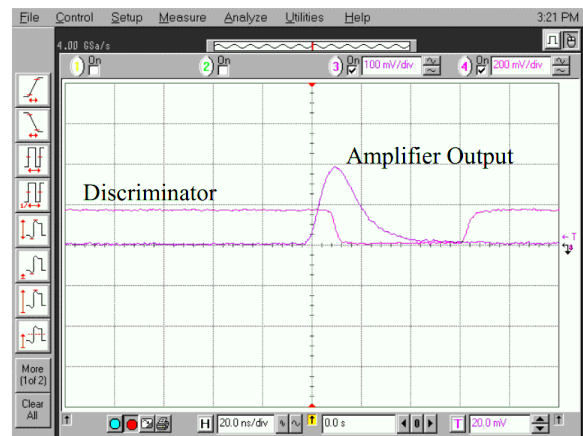
Die Zeit, welche gerade zwischen den ersten und zweiten Lichtimpulsen liegt, wird genutzt, um die Lebensdauer von Myonen zu bestimmen.

Hierbei kann man die Fehlinterpretation von, zeitlich nahe beieinander liegenden Lichtimpulsen durch die Einschränkung des betrachteten Zeitintervalls vermieden werden. Entstehen kurz nacheinander einige Photonen, bspw. durch die Wechselwirkung eines durchfliegenden Myons mit dem Szintillator und durch einen Zerfall, so kann über den PMT nicht festgestellt werden, ob diese zusammen gehören oder nicht. Beschränkt man sich nun für die Messung eines Zerfalls auf einen kleinen Zeitraum (etwa die zu erwartende Lebensdauer + 50%), so lässt sich darüber bereits ein großer Teil 'falscher' Lichtimpulse ausschließen.

Das Signal aus dem Sekundärelektronenvervielfacher geht in einen zweistufigen Verstärker, welcher wiederum in einen Komparator führt. Dieser sog. Diskriminator vergleicht das analoge Eingangssignal mit einer regelbaren Spannung und sendet, dem Ergebnis des Vergleichs entsprechend, einen Transistor-Transistor-Logik-Puls weiter. Der Puls des Diskriminators geht in einen Zeitschaltkreis, welcher den besprochenen Anforderungen genügt.



(a) Ausgang des PMT bei einem signifikanten Lichtimpuls



(b) Signal des Diskriminators gegen das des PMT

Abb. 2: Oszillogramme für einen Lichtimpuls

### 3 Durchführung

Eingangs wird der Diskriminator auf eine geeignete Spannung eingestellt. Diese sollte für kurze Messzeiten in etwa den Erwartungen aus den Grundlagen entsprechen, beachtet man dabei die Fläche des Szintillators.

Anschließend wird für eine Zeit von 1000 s die Zahl der einfallenden Myonen beobachtet.

Es folgen jeweils eine 24 h dauernde Messung mit und ohne Abschirmung (Papier) über dem Aufbau.

## 4 Auswertung

### 4.1 Rate der einfallenden Myonen

Im Folgenden sind die Zählraten der Ereignisse im Szintillator für verschiedenen Gesamtdauern und Auswertungsintervalle dargestellt.

Die Intervalle, welche für die Auswertung genutzt wurden, sind 1 s, 2 s, 5 s und 10 s. Die Messungen wurden über eine Dauer von 1000 s (siehe Abb. 3) und 24 h (siehe Abb. 4 und Abb. 5) durchgeführt. In den Abbildungen wird die Zahl der Ereignisse für ein Auswertungsintervall gegen ihre Häufigkeit über die gesamte Dauer aufgetragen.

Offensichtlich genügt die Rate der einfallenden Myonen, in Abhängigkeit der Intervallgröße, einersog. *Poisson-Verteilung*. Für diese gilt allgemein: der Erwartungswert ist die charakteristische Größe der Verteilung und ist gleich der zugehörigen Varianz. Außerdem gibt der Variationskoeffizient  $VarK(\dots)$ , welcher einer normierten Standardabweichung entspricht, die Schwankungen des Erwartungswertes über  $1/\sqrt{\text{Erwartungswert}}$  an. In 1,2 und 3 sind die jeweiligen Größen angegeben.

Intervalldauer	Erwartungswert/Ereignissen	Variationskoeffizient/Ereignissen
1 s	2,188699	0,6759381
2 s	4,250295	0,4850544
5 s	10,607213	0,307043
10 s	21,972804	0,21333

Tabelle 1: Wertetabelle für die Messung über 1000 s

Intervalldauer	Erwartungswert/Ereignissen	Variationskoeffizient/Ereignissen
1 s	2,773809	0,60042
2 s	5,529319	0,4252694
5 s	13,816412	0,26903
10 s	27,793620	0,18968

Tabelle 2: Wertetabelle für die Messung über 24 h mit Absorber

Intervalldauer	Erwartungswert/Ereignissen	Variationskoeffizient/Ereignissen
1 s	2,797301	0,59790
2 s	5,624372	0,421660
5 s	14,141827	0,26591
10 s	28,149074	0,18848

Tabelle 3: Wertetabelle für die Messung über 24 h ohne Absorber



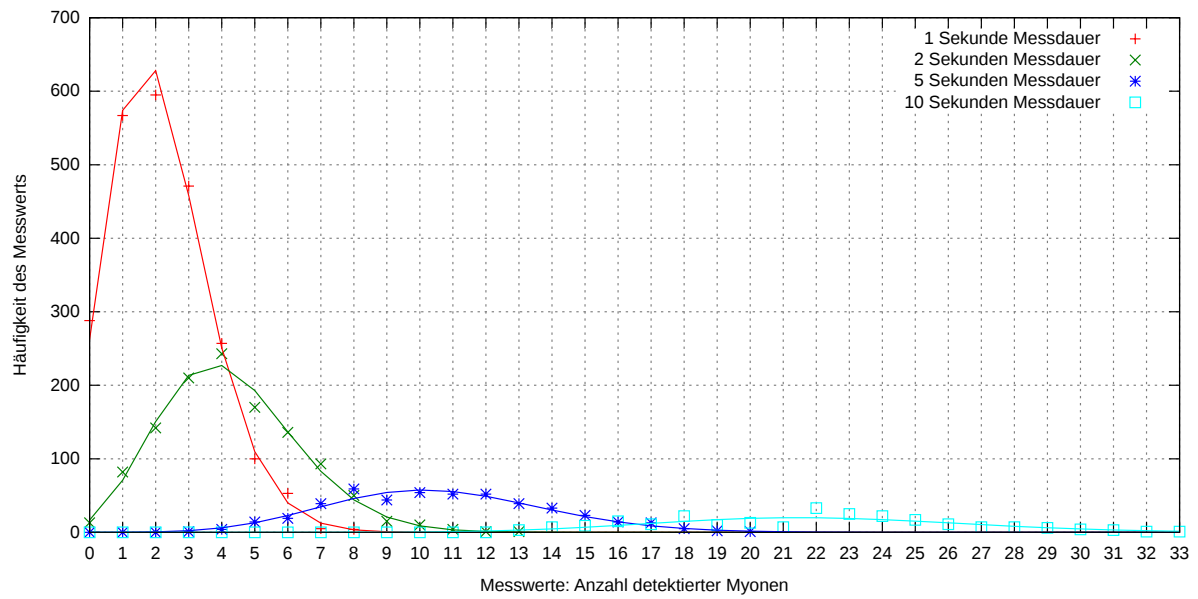


Abb. 3: Zählrate für eine Messung über 1000 s mit der Absorption eines Stapels Papier

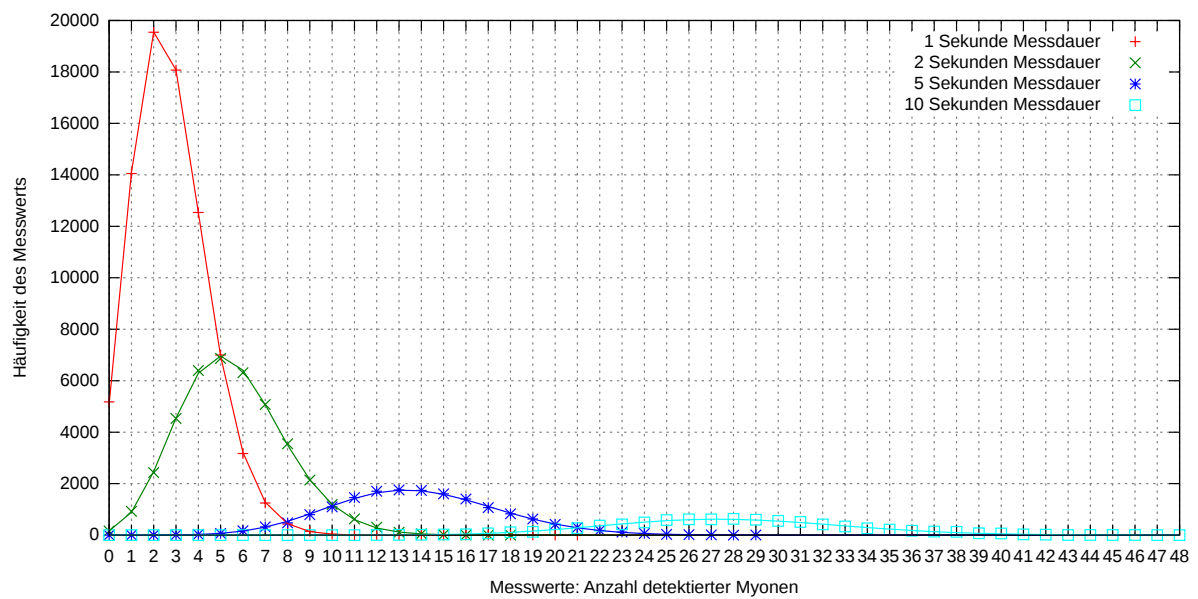


Abb. 4: Zählrate für eine Messung über 24 h mit der Absorption eines Stapels Papier

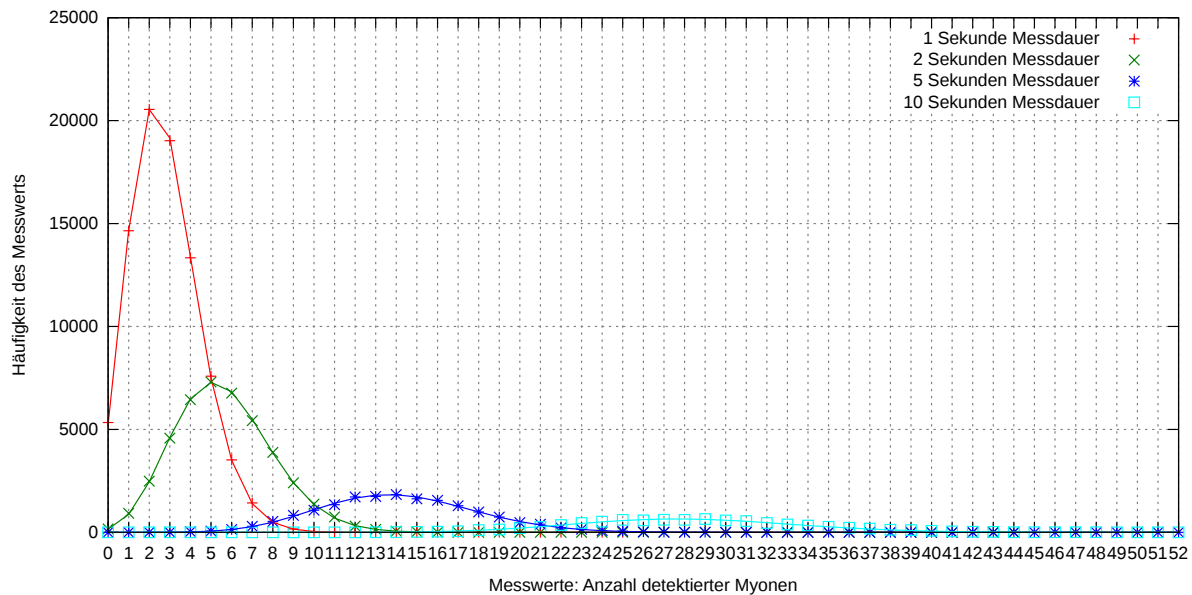


Abb. 5: Zählrate für eine Messung über 24 h ohne Absorption

Nimmt man sich die Grundfläche des Szintillatorzylinders als Eintrittsfläche her und betrachtet den Literaturwert der Einfallrate  $1 \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$  als gegeben, so errechnet sich eine zu erwartende Ereigniszahl von  $\approx 1 \frac{1}{\text{s}}$ . Der Vergleich ( $\approx 2 \frac{1}{\text{s}}$ ) lässt die Messwerte plausibel erscheinen, wobei ja jeglicher Einfall, außer dem senkrechten, vernachlässigt wurde. Besonders die Korrelation zwischen den eintägigen Messungen bestätigt die Messwerte, da dort der, wenn auch geringe, Einfluss des Absorbers sichtbar wird.

## 4.2 Lebensdauer der Myonen

Die Abb. 6 bis Abb. 10 zeigen die Messdaten für die Zerfälle der Myonen und einen entsprechenden exponentiellen Fit durch diese hindurch. Die daraus erhaltenen Werte für die Lebensdauer der Myonen werden dabei unter der Annahme angegeben, dass die Zeit zwischen Eintritt und Zerfall des Teilchens gerade  $\tau$  entspricht. Diese Aussage ist offensichtlich eine Vereinfachung zur Bestimmung der Halbwertszeit, da hierbei die Zeit, welche das Myon außerhalb des Messaufbaus verbringt, vernachlässigt wird.

In ?? sind die Lebensdauern für die jeweiligen Auflösungsintervalle angegeben.

Intervalllänge/s	Lebensdauer/ns
10	2085,56
20	2085,59
50	2064,36
100	2041,53
1000	1994,02

Nach Literatur<sup>[IV]</sup> beträgt die wahre Lebensdauer eines Myons  $2196,982 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ . Unter der gemachten Näherung sind die erhaltenen Messwerte damit in einem angemessenen Fehlerbereich um den Literaturwert.

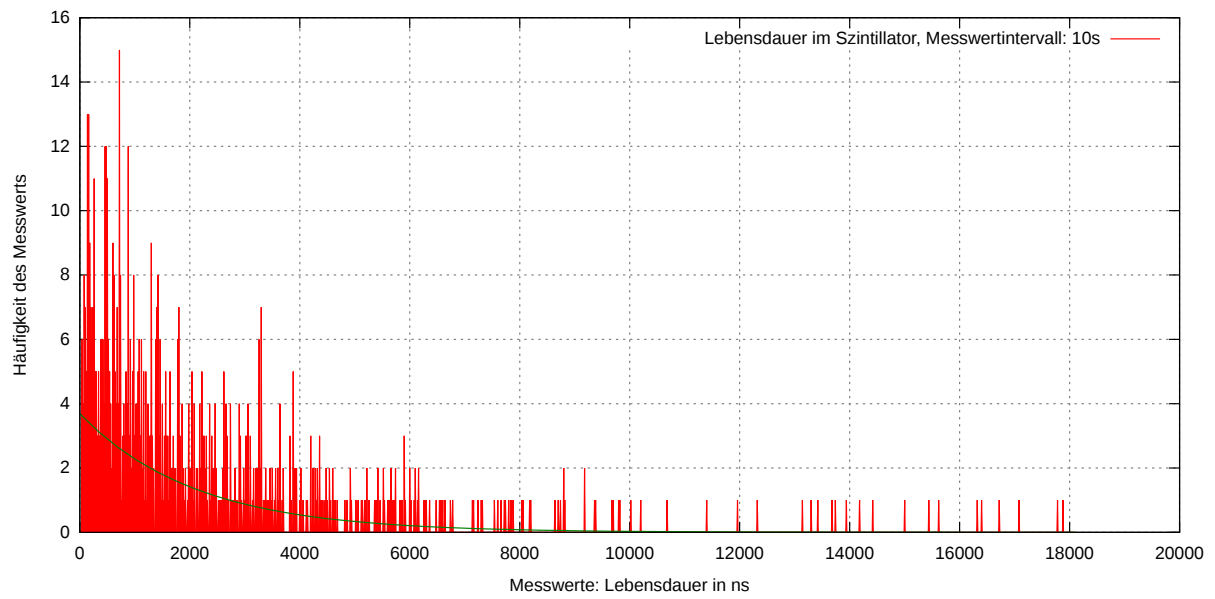


Abb. 6: Exponentieller Fit und Messdaten der Myonen-Zerfälle für eine Intervallauflösung von 10 s

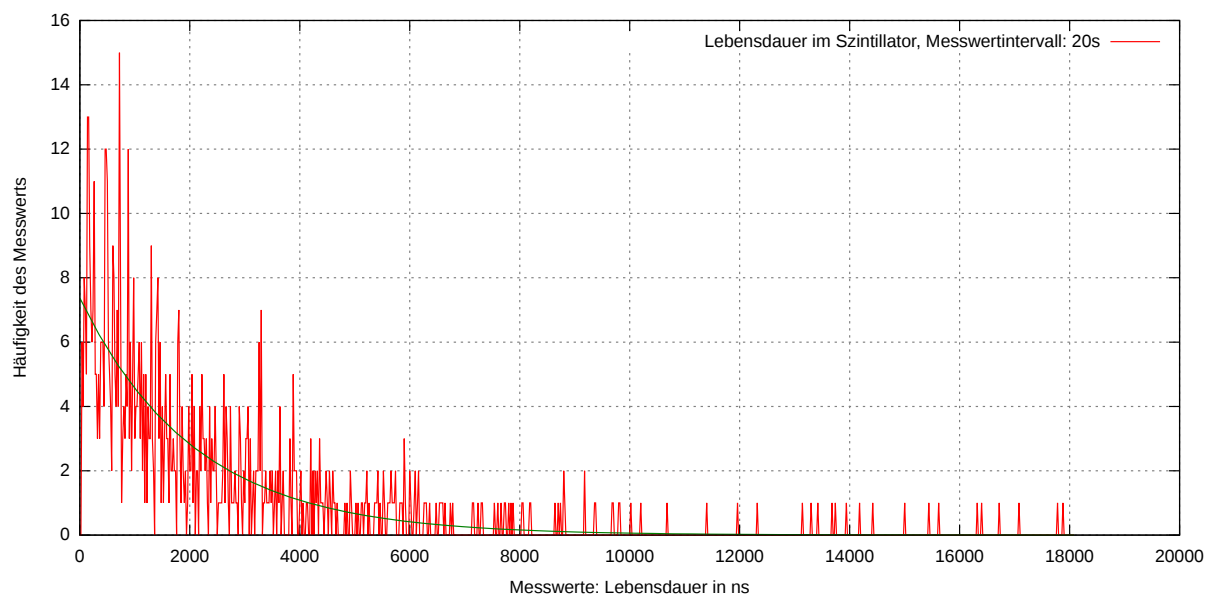


Abb. 7: Exponentieller Fit und Messdaten der Myonen-Zerfälle für eine Intervallauflösung von 20 s

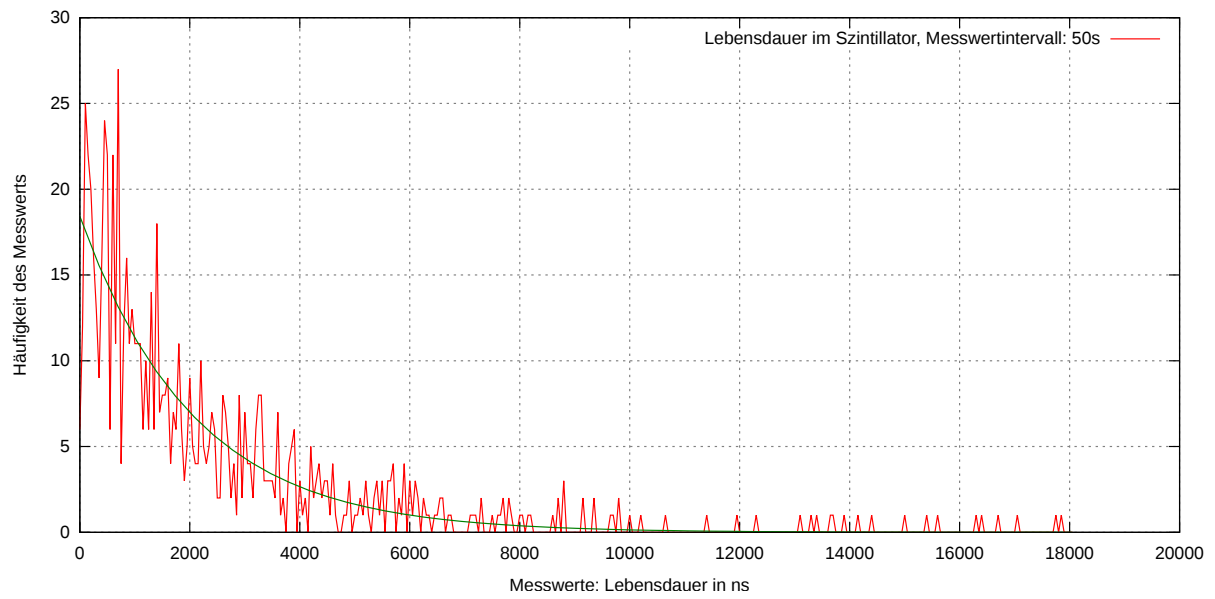


Abb. 8: Exponentieller Fit und Messdaten der Myonen-Zerfälle für eine Intervallauflösung von 50 s

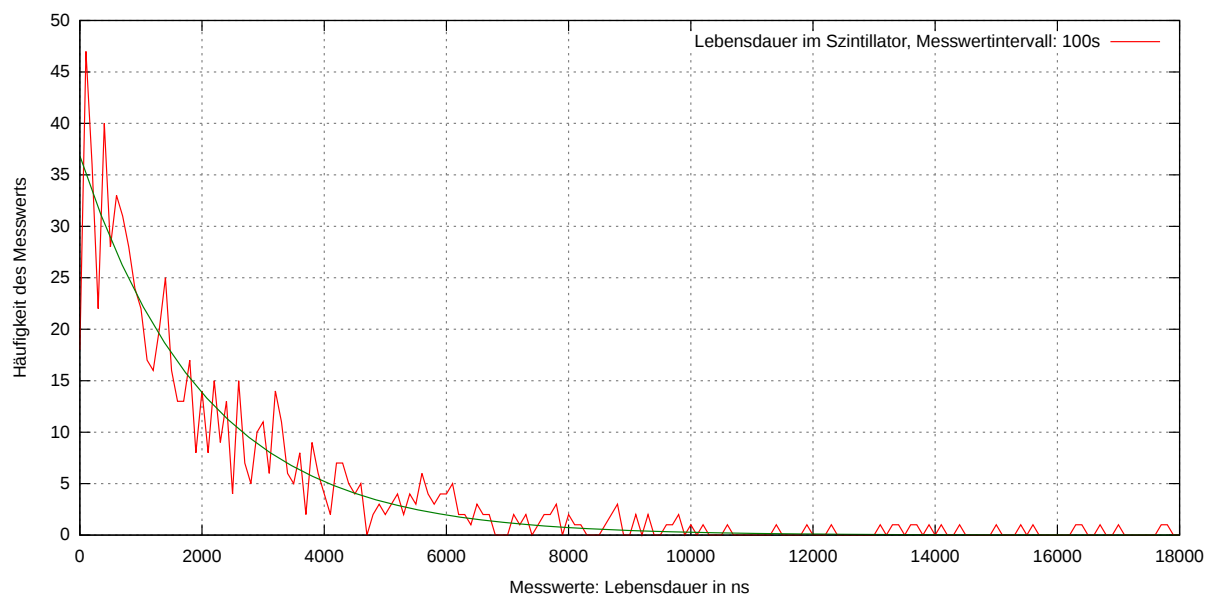


Abb. 9: Exponentieller Fit und Messdaten der Myonen-Zerfälle für eine Intervallauflösung von 100 s

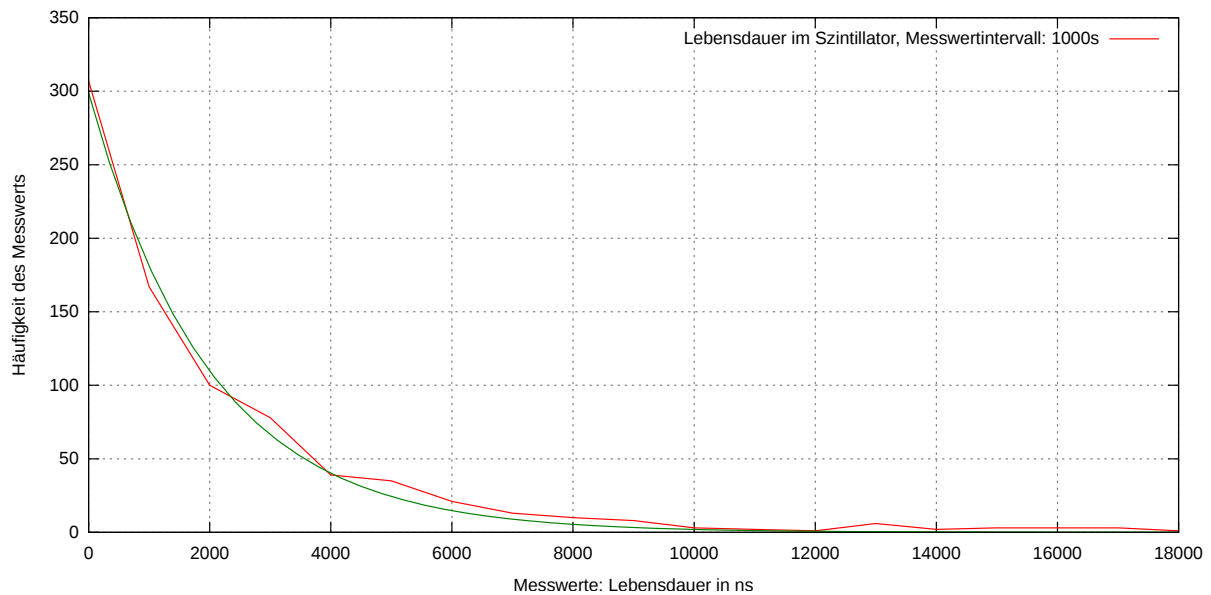


Abb. 10: Exponentieller Fit und Messdaten der Myonen-Zerfälle für eine Intervallaufösung von 1000 s

### 4.3 Absorption

Nimmt man für die Absorption durch das verwendete Papier ein Exponentialgesetz der Form  $\exp(-\alpha_p \cdot h)$ , mit dem Abschwächungskoeffizienten  $\alpha_p$  und der Dicke  $h$  des Papiers, an, so kann unter Vergleich der Daten der unterschiedlichen Messungen Rückschluss auf den Absorptionsfaktor gezogen werden.

$$\begin{aligned} &\text{Zählrate ohne Absorber } N_0 \\ &\text{Zählrate mit Absorber } N(h) = N_0 \exp(-\alpha_p \cdot h) \end{aligned} \quad (14)$$

Mit der Gl. (14) können die Messergebnisse aus 2 und 3 in 4 weiterverarbeitet werden.

Intervalllänge	Absorptionskoeffizient/ $\frac{1}{m}$
1 s	0,008433
2 s	0,017044
5 s	0,02328
10 s	0,012707

Tabelle 4: Absorptionskoeffizient aus dem Wertevergleich vorheriger Messungen und über 14

Für einen Vergleich zur Literatur ließen sich leider keine geeigneten Werte finden. Ein Fehler dieser Art der Herangehensweise an die Absorption durch das Papier kann u.a. der nicht-senkrechte Einfall in den Messaufbau und damit der Verzerrung der Berechnung sein. Das Miteinbeziehen unterschiedlicher Luftdrücke erscheint nicht sinnvoll, da das Myon aus großen Höhen durch sehr viele Atmosphärenschichten gelangt. Deswegen müssten, für eine adequate Betrachtung des Einflusses der Wetterverhältnisse auf die Myonen-Strahlung auf

die Erde, sämtliche betreffenden Parameter (Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, Verschmutzung usw.) zumindest entlang eines vertikalen Schnittes von einer fiktiven Quelle aus, welche senkrecht auf dem Aufbau steht, bis zur Messapparatur bekannt sein.

## 5 Quellen

[I] – <http://de.wikipedia.org/wiki/Myon>; Abschn.: Zerfall, Quelle Abb. 1

[II] – <http://de.wikipedia.org/wiki/W-Boson>

[III] – Versuchsanleitung „Myonenspektrometer“; T.E. Coan, J. Ye; Quelle Abb. 2, S.18

[IV] – <http://de.wikipedia.org/wiki/Myon>